

อิทธิพลของอุณหภูมิแบบหล่อต่อข้อบกพร่องของโลหะผสมสีขาว ในกระบวนการหล่อซีพิงหาย

จิตรลดา พิศาลสังฆคุณ¹ สิริพร โรจนนันต์^{2*} และ สุรศิษฐ์ โรจนนันต์³
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแบบหล่อต่อข้อบกพร่องของโลหะผสมสีขาวในกระบวนการหล่อซีพิงหาย ทั้งนี้ทดลองหลอมโลหะผสมสีขาวที่อุณหภูมิคงที่ 990 องศาเซลเซียส และใช้อุณหภูมิแบบหล่อซึ่งทำจากปูนปลาสเตอร์สำหรับงานหล่อเครื่องประดับ ที่ 400, 550 และ 630 องศาเซลเซียส กำหนดรูปร่างชิ้นงานเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 24 มิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร ข้อบกพร่องที่ศึกษา ได้แก่ การหดตัวและรูพรุน ผลการทดลองพบว่า การหล่อโดยใช้อุณหภูมิแบบหล่อ 400 องศาเซลเซียส ทำให้ชิ้นงานมีการหดตัวเชิงปริมาตรต่ำสุด คิดเป็นร้อยละ 2.23 ในขณะที่การหดตัวเชิงเส้นสูงสุดในทิศทางขนานกับการไหลของโลหะ คิดเป็นร้อยละ 0.81 โดยพบที่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงานส่งผลให้เกิดรูพรุน พื้นที่รูพรุนต่อพื้นที่ทั้งหมด คิดเป็นร้อยละ 0.41 ซึ่งมีค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับการหล่อด้วยอุณหภูมิแบบหล่อที่สูงขึ้น จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าการหล่อชิ้นงานโลหะผสมสีขาวด้วยอุณหภูมิแบบหล่อ 400 องศาเซลเซียส มีผลต่อการหดตัวและรูพรุนในกระบวนการหล่อซีพิงหายต่ำที่สุด

คำสำคัญ : กระบวนการหล่อซีพิงหาย / ตัวแปรการหล่อ / ข้อบกพร่องการหล่อ / โลหะผสมสีขาว

* Corresponding Author : siriporn.roj@kmutt.ac.th

1 นักศึกษาปริญญาโท สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

2 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

3 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

Effect of Mold Temperature on Defects for White Alloy in Loss Wax Casting Process

Chitlada Pisansungkakoon¹, Siriporn Rojananan^{2*} and Surasit Rojananan³

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkhru, Bangkok 10140

Abstract

The objective of this work was to study the effect of mold temperature on defects of white alloy in the loss wax casting process. White alloy ingots were melted at a constant temperature of 990 °C. A plaster mold for jewelry casting was selected and preheated at the temperatures of 400, 550 and 630 °C. Sample was of a rectangular shape with the dimensions of 20 mm x 24 mm x 2 mm. Casting defects were investigated in terms of shrinkage and porosity. The experimental results showed that as-cast samples exhibited the lowest volume shrinkage of 2.23% when the mold temperature was 400 °C. The highest linear shrinkage in a parallel direction with the molten flow was 0.81%, which occurred at the center of the sample, resulting subsequently in the pores. The lowest value of porosity of the sample was 0.41%, which was noted in the sample molded at 400 °C. In conclusion, at the mold temperature of 400 °C led to the lower level of shrinkage and porosity for white alloy in loss wax casting process.

Keywords : Loss Wax Casting / Variable Casting / Defect Casting / White Alloy

* Corresponding Author : siriporn.roj@kmutt.ac.th

¹ Master Degree Student, Division of Materials Technology, School of Energy, Environment and Materials.

² Assistant Professor, Division of Materials Technology, School of Energy, Environment and Materials.

³ Assistant Professor, Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

เครื่องประดับแฟชั่น เป็นสินค้าที่มีรูปร่างที่หลากหลายเปลี่ยนแปลงตามเทศกาลและยุคสมัย จึงนิยมผลิตโดยกระบวนการหล่อซึ่งสูญหาย (Loss Wax) เนื่องจากสามารถผลิตชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก รายละเอียดซับซ้อน และผลิตได้ครั้งละจำนวนมาก ขั้นตอนการหล่อชิ้นงานทำได้โดยเทโลหะหลอมเหลวลงในแบบหล่อปูนที่ผ่านการให้ความร้อนเพื่อเผาไล่เทียนต้นแบบออก และให้ความร้อนแก่แบบหล่อก่อน (Preheat) เทโลหะเพื่อหล่อชิ้นงาน ทำให้อุณหภูมิระหว่างโลหะหลอมเหลวกับแบบหล่อไม่แตกต่างกันมากนัก ช่วยให้โลหะหลอมเหลวไหลตัวในโพรงแบบหล่อได้ดีขึ้น [1] ซึ่งผู้ผลิตต้องกำหนดตัวแปรการหล่อ เช่น อุณหภูมิหลอม และอุณหภูมิแบบหล่อ เป็นต้น ทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างชิ้นงานและชนิดโลหะ เพื่อป้องกันการเกิดข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้น [2] เช่น การหล่อไม่เต็มแบบ ชิ้นงานหดตัว รูพรุนจากการหดตัวและรูพรุนจากแก๊ส เป็นต้น [3]

ข้อบกพร่องที่พบบ่อยในการหล่อชิ้นงานเครื่องประดับ ได้แก่ การหดตัว (Contraction) และรูพรุน (Porosity) การหดตัวของชิ้นงานมีลักษณะเป็นโพรงยุบตัวของโลหะหรือรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปจากชิ้นงานต้นแบบ มีสาเหตุจากการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งและขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการถ่ายโอนความร้อนออกจากโลหะหลอมเหลว [4] เมื่อโลหะแข็งตัวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรหรือความหนาแน่น ลักษณะการหดตัวเกิดได้ 3 ช่วง [5] การหดตัวของของเหลว (Liquid Contraction) เกิดการหดตัวขณะที่เป็นของเหลวซึ่งอยู่ในสภาวะความร้อนยิ่งยวด (Superheat) การหดตัวขณะแข็งตัว (Solidification Contraction) โลหะเกิดการหดตัวในขณะที่เปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นของแข็งทั้งหมด และสุดท้ายการหดตัวของแข็ง (Solid Contraction) โลหะเกิดการหดตัวจากอุณหภูมิที่แข็งตัวไปจนถึงอุณหภูมิห้อง ส่วนการเกิดรูพรุน มี 2 แบบ [6] ได้แก่รูพรุนจากการหดตัว (Shrinkage Porosity) มีลักษณะเป็นกลุ่ม รูพรุนขนาดเล็ก ผิวหยาบ และรูปร่างไม่แน่นอน เกิดจากโลหะหลอมเหลวเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง เนื่องจากโลหะหลอมเหลวที่แข็งตัวไปก่อนเกิดการไหลเข้าของโลหะหลอมเหลว ทำให้ไม่สามารถขดเซยโลหะหลอมเหลว

บริเวณที่แข็งตัวภายหลัง จึงเกิดเป็นรูพรุนเนื่องจากการหดตัว [7] และรูพรุนจากแก๊ส (Gas Porosity) มีลักษณะผิวเรียบและรูปร่างกลม เกิดจากฟองอากาศที่แทรกเข้าไปในโลหะหลอมเหลว หรือเกิดการปั่นป่วนขณะเทโลหะหลอมเหลวเข้าสู่โพรงแบบหล่อ ฟองอากาศแยกตัวออกมาในขณะที่โลหะกำลังแข็งตัวและกระจายอยู่ที่ผิวชิ้นงานหล่อ [8]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การหดตัวและรูพรุนของชิ้นงานหล่อ เป็นผลจากหลายปัจจัย เห็นได้จากงานวิจัยของ Korojy และคณะ [9] ศึกษาการหดตัวของโลหะผสมของทองแดง-ตะกั่ว และโลหะผสมของทองแดง-ดีบุก-ตะกั่ว หลอมวัดอุณหภูมิด้วยเตาอินดักชันภายใต้บรรยากาศแก๊สอาร์กอน พบว่าอัตราการเย็นตัวของโลหะมีผลต่อการหดตัวของชิ้นงาน เมื่อโลหะมีอัตราการเย็นตัวเร็วส่งผลให้การหดตัวของชิ้นงานหล่อลดลง ขณะที่งานวิจัยของ Ogura [10] พบว่าการหดตัวบริเวณกึ่งกลางและขอบของชิ้นงานหล่อผนังบางรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีค่าแตกต่างกันเป็นผลจากอุณหภูมิโลหะหลอมที่เปลี่ยนแปลงภายในโพรงแบบหล่อ เนื่องจากรูเทโลหะหลอมเหลวอยู่ตรงกึ่งกลางชิ้นงานหล่อ เมื่อโลหะหลอมเหลวไหลเข้าโพรงแม่พิมพ์ส่งผลให้บริเวณขอบของชิ้นงานมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน ดังนั้นบริเวณขอบของชิ้นงานจึงเกิดการแข็งตัวได้ง่ายและทำให้เกิดการหดตัวน้อยกว่าบริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน จากงานวิจัยของ Prakash และคณะ [6] ศึกษาการเกิดรูพรุนจากการหดตัวและรูพรุนจากแก๊สของโลหะผสมของแมกนีเซียมด้วยกระบวนการหล่อความดันสูง พบว่า ชิ้นงานเกิดรูพรุนจากการหดตัวและรูพรุนจากแก๊ส จำแนกได้จากรูปร่าง กล่าวคือรูพรุนจากการหดตัวมีลักษณะเป็นกลุ่มรูพรุนขนาดเล็ก ส่วนรูพรุนจากแก๊สมีลักษณะเป็นรูพรุนเดี่ยวกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวชิ้นงาน ซึ่งรูพรุนจากการหดตัวมีจำนวนน้อยกว่าและขนาดเล็กกว่ารูพรุนจากแก๊ส จากงานวิจัยของ Zhang [11] ศึกษาเทคโนโลยีการออกแบบและการกำจัดข้อบกพร่องการหล่อเครื่องประดับโลหะผสมของทองด้วยกระบวนการหล่อซึ่งสูญหาย พบว่า การหล่อชิ้นงานด้วยอุณหภูมิหลอม 990 ถึง 1,010 องศาเซลเซียส และอบแบบหล่อปูนด้วยอุณหภูมิในช่วง 720 ถึง 780 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อการเกิดรูพรุนจากการหดตัวซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนสถานะจาก

ของเหลวไปเป็นของแข็ง และจากงานวิจัยของ ลีริพร โรจนนันต์ และ คณะ [12] ศึกษาอิทธิพลของตัวแปร ในกระบวนการหล่อแบบหมุนเหวี่ยงที่มีผลต่อการหดของ สังกะสีผสม พบว่าการหลอมชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงส่งผล ให้การหดตัวของชิ้นงานสูงขึ้น ขณะที่ความเร็วรอบในการ หล่อเหวี่ยงสูงขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานหดตัวลดลง และการ หดตัวของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากกับแรงเหวี่ยงมีค่า มากกว่าการหดตัวในทิศทางขนานกับแรงเหวี่ยง เนื่องจากการ หมุนของแบบหล่อส่งผลให้โลหะหลอมเหลวไหลเข้าสู่ โพรงแบบหล่อในทิศทางขนานกับแรงเหวี่ยงและจากการ เหวี่ยงอัดโลหะหลอมเหลวเข้ากับโลหะหลอมเหลวที่ไหล เข้ามาก่อนแล้วจนเกิดการแข็งตัวทำให้การหดตัวของ ชิ้นงานลดลง

จากที่กล่าวมาข้างต้น เห็นได้ว่าการหดตัวและรูพรุน ของชิ้นงานหล่อเป็นผลมาจากตัวแปรการหล่อที่ใช้ใน กระบวนการหล่อที่แตกต่างกัน และชนิดของโลหะที่ใช้ ในการหล่อแตกต่างกัน เช่น โลหะผสมของทองแดง แมกนีเซียม สังกะสี และทอง เป็นต้น แต่ยังไม่พบการ ศึกษาตัวแปรในการหล่อที่มีผลต่อการหดตัวและรูพรุน ของโลหะผสมสีขาวด้วยกระบวนการหล่อซีพิงหาย จึง เป็นที่มาของงานวิจัยนี้ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการกำหนด ตัวแปรการหล่อและเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและ การผลิตชิ้นงานเครื่องประดับต่อไป

2. วิธีการศึกษาและวัสดุอุปกรณ์

2.1 การหล่อซีพิงหาย ส่วนผสมทางเคมี และจุด หลอมเหลว

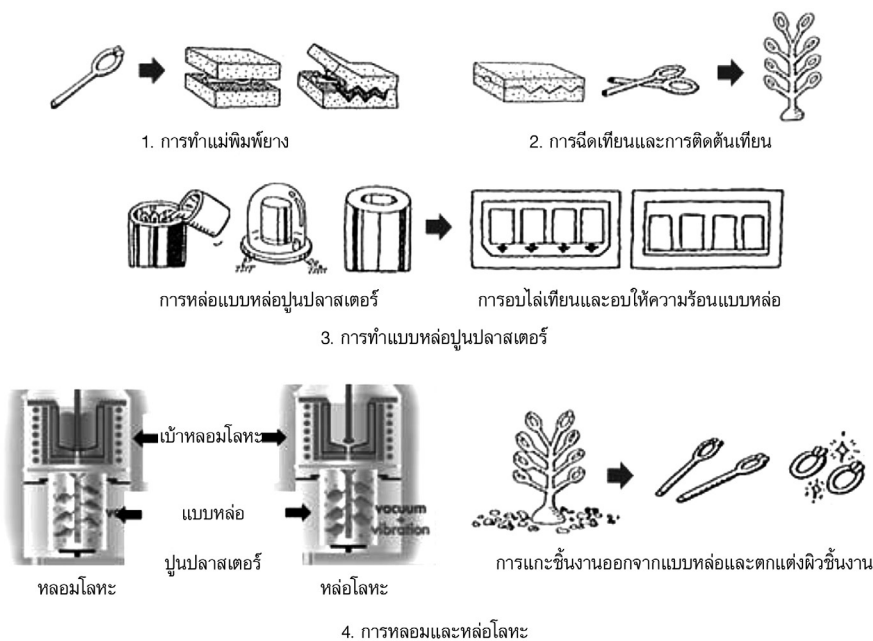
กระบวนการหล่อซีพิงหาย แสดงดังรูปที่ 1 แบ่ง เป็นขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอนดังนี้

1. การทำแม่พิมพ์ยาง เริ่มจากนำชิ้นงานต้นแบบ มาอัดกับแผ่นยางโดยการให้แรงดันและความร้อนด้วย เครื่องอัดพิมพ์ยาง จากนั้นนำแม่พิมพ์ยางแช่น้ำให้เย็นตัว ลงแล้วนำมาผ่าเอาชิ้นงานต้นแบบออกจะได้แม่พิมพ์ยางที่มี โพรงแบบเหมือนชิ้นงานต้นแบบ

2. การฉีดเทียนและติดต้นเทียน นำเทียน (Wax) มาหลอมในเครื่องฉีดเทียนที่อุณหภูมิประมาณ 60 ถึง 80 องศาเซลเซียส ทำการฉีดเทียนเข้าแม่พิมพ์ยางจนเต็ม ปลอ่ยให้เทียนแข็งตัวแล้วแกะเทียนต้นแบบ จากนั้น นำเทียนต้นแบบมาติดกับต้นเทียนที่ทำหน้าที่เป็นรูเท (Sprue) ของโลหะหลอมเหลว

3. การทำแบบหล่อปูนปลาสเตอร์ โดยนำปูน- ปลาสเตอร์ผสมกับน้ำ อัตราส่วนปูนปลาสเตอร์ 100 กรัม ต่อ น้ำ 38 มิลลิลิตร แล้วเทหล่อกับต้นเทียนที่ประกอบ กับกระบอกโลหะสำหรับใช้เป็นแบบหล่อ นำแบบหล่อ ปูนปลาสเตอร์ไปอบไล่เทียนต้นแบบจะได้โพรงแบบหล่อที่มี ลักษณะเหมือนต้นเทียน และอบให้ความร้อนแบบหล่อ ก่อน (Preheat) เทโลหะหลอมเหลว

4. การหลอมและหล่อโลหะ นำแบบหล่อปูนที่อบ ให้ความร้อนมาประกอบเข้ากับเตาหล่อ จากนั้นนำอินกอต โลหะผสมสีขาวใส่เข้ากราดไฟต์ที่บรรจุอยู่ในเตาหล่อ เมื่อ อินกอตหลอมละลายแล้วโลหะหลอมเหลวจะถูกดูดเข้าสู่ โพรงแบบหล่อด้วยระบบสุญญากาศ จากนั้นปลอ่ยให้ โลหะแข็งตัวในแบบหล่อประมาณ 20 นาที จึงนำไปจุ่ม น้ำที่อุณหภูมิห้อง ล้างต้นชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดน้ำแรงดัน สูง แล้วนำไปต้มกับสารละลายกรดฟอสฟอริกที่มีส่วนผสม ของกรดฟอสฟอริก 20 มิลลิลิตรต่อ น้ำ 40 มิลลิลิตร เพื่อ ทำความสะอาดผิวชิ้นงานและกำจัดออกไซด์ที่ผิว ตัด ชิ้นงานออกจากต้นแล้วนำไปขัดเพื่อให้ผิวเรียบและมีความ มันวาว

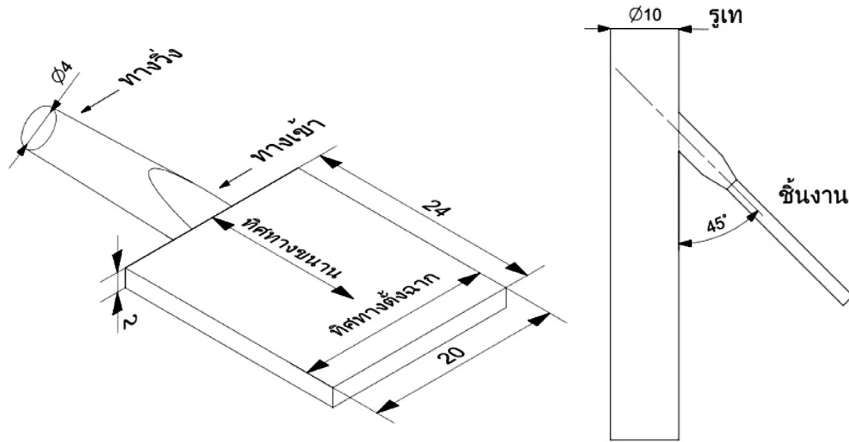


รูปที่ 1 กระบวนการหล่อซีพิ้งหาย [13, 14]

โลหะผสมสีขาวที่ศึกษา มีส่วนผสมหลักของโลหะทองแดง-สังกะสี-แมงกานีส [15] มีค่าปริภูมิสีอยู่ในระดับมาตรฐาน ($L^* > 75$, $-2 \geq a^* \leq 2$, $-2 \leq b^* \leq 10$ และ $YI \leq 19$) ในการทดลองได้หลอมอินกอตโลหะผสมสีขาวด้วยเตาหลอมสูญญากาศแบบใช้แรงดัน (Vacuum Pressure Casting Machine) ผลิตโดยบริษัท Yasui รุ่น KT17B ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทไอ-เทค คลาสติง จำกัด ใช้เบ้าหลอมทำจากกราไฟต์ และแบบหล่อทำจากปูนปลาสเตอร์สำหรับหล่อเครื่องประดับ ผลิตโดยบริษัทสยามแคสติงเพาเวร์เตอร์ส จำกัด ในการทดลองได้วิเคราะห์อุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะผสมสีขาวด้วยเทคนิค Differential Thermal Analysis (DTA) ทำให้ทราบว่าโลหะผสมสีขาวมีอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 835 องศาเซลเซียส การกำหนดอุณหภูมิหลอมโลหะที่ช่วยให้เกิดการไหลของโลหะหลอมเหลวเข้าสู่โพรงแบบหล่อได้ดีคืออุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 150 องศาเซลเซียส [2] ในที่นี้จึงกำหนดอุณหภูมิหลอมคงที่ 990 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิแบบหล่อได้อย่างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยโลหะผสมสีขาว [15] จึงกำหนดเป็น 400, 550 และ 630 องศาเซลเซียส

เครื่องประดับโดยทั่วไปมีรูปร่างชิ้นงานที่หลากหลายปัญหาที่พบบ่อยมักเป็นชิ้นงานบางที่มีพื้นที่ผิวกว้าง ดังนั้นการทดลองนี้จึงออกแบบชิ้นงานหล่อที่มีลักษณะคล้ายกับชิ้นงานเครื่องประดับที่มีพื้นที่ผิวกว้างและมีความหนาแน่นแสดงดังรูปที่ 2 รูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความกว้าง 20 มิลลิเมตร ความยาว 24 มิลลิเมตร และความหนา 2 มิลลิเมตร ทางเข้า (Gate) ของโลหะหลอมเหลว มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 2 มิลลิเมตร ยาว 4 มิลลิเมตร ทางวิ่ง (Runner) ของโลหะหลอมเหลว มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ชิ้นงานทำมุม 45 องศา กับรูเท (Sprue) ของโลหะหลอมเหลวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ศึกษาการหดตัวและรูพรุนในชิ้นงานหล่อจากการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 2 ขนาดชิ้นงานและทิศทางการไหลเข้าของโลหะหลอมเหลว

2.2 การวัดการหดตัวของชิ้นงานหล่อ

การหดตัวของชิ้นงานหล่อ คำนวณค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตร (Volume Shrinkage) จากสมการที่ 1 ซึ่งน้ำหนักและหาความหนาแน่นชิ้นงานแบบแทนที่น้ำด้วยเครื่องชั่ง ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo รุ่น MS1003S คำนวณปริมาตรชิ้นงานจากสมการที่ 2 และการคำนวณค่าร้อยละการหดตัวเชิงเส้น (Linear Shrinkage) ในทิศทางขนานและทิศทางตั้งฉากกับการไหลเข้าของโลหะหลอมเหลว คำนวณค่าร้อยละการหดตัวเชิงเส้น จากสมการที่ 3 วัดขนาดชิ้นงานด้วยเครื่อง Professional Digital Micrometer ผลิตโดยบริษัท Sylvac สหภาพรัฐสวิส ตามมาตรฐาน DIN 863 รุ่น IP67

$$\text{ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตร} = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100 \quad (1)$$

V_0 คือ ปริมาตรโพรงแบบ และ V_1 คือ ปริมาตรชิ้นงานหล่อ

$$\text{ปริมาตรชิ้นงาน} = \alpha \times \frac{A - B}{\rho_0 - \rho_L} \quad (2)$$

A = น้ำหนักที่ชั่งในอากาศ

B = น้ำหนักที่ชั่งในน้ำ

ρ_0 = ความหนาแน่นของน้ำ

ρ_L = ความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ 0.0012 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

α = ค่าแรงลอยตัวของอากาศเท่ากับ 0.99985

$$\text{ร้อยละการหดตัวเชิงเส้น} = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100 \quad (3)$$

L_0 คือ ความยาวโพรงแบบ (ทิศทางขนานและทิศทางตั้งฉากกับการไหลเข้าของโลหะหลอมเหลว) L_1 คือ ความยาวชิ้นงานหล่อ (ทิศทางขนานและทิศทางตั้งฉากกับการไหลเข้าของโลหะหลอมเหลว)

2.3 การหาปริมาณพื้นที่รูพรุนของชิ้นงานหล่อ

การเตรียมผิวชิ้นงานเริ่มจากขัดผิวชิ้นงานหล่อด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 800, 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ แล้วนำมาขัดเงาด้วยผงอะลูมินาขนาด 1 ไมครอน ล้างชิ้นงานด้วยน้ำสะอาดและเป่าให้แห้ง จากนั้นนำชิ้นงานไปถ่ายภาพผิวตลอดทั้งผิวหน้าชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง เนื่องจากบริเวณที่เป็นรูพรุนแสดงลักษณะเป็นสีดำ แล้วนำภาพถ่ายไปวัดปริมาณพื้นที่รูพรุนด้วยเทคนิควิเคราะห์ด้วยภาพโดยใช้โปรแกรม Image J ซึ่งเริ่มจากนำภาพถ่ายไปแปลงไฟล์เป็นภาพสีเทา 8 บิต (8-Bit Gray Scale Image) ตั้งค่าโปรแกรมให้สแกนภาพถ่ายบริเวณที่เป็นสีดำ ที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ตารางไมโครเมตร เพื่อเก็บข้อมูลปริมาณและพื้นที่รูพรุน

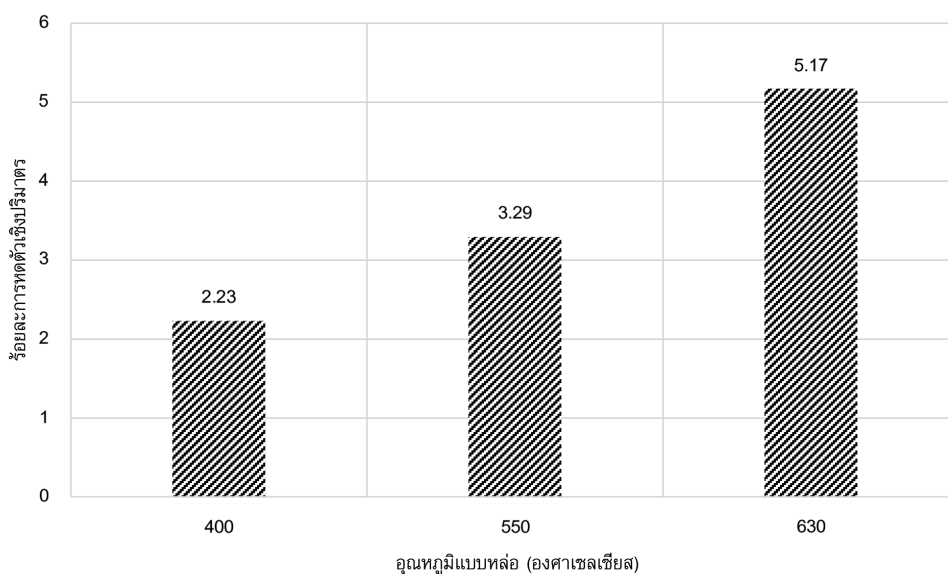
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา

3.1 ผลการวิเคราะห์การหดตัว

การหล่อชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามอนุกรมรูปแบบหล่อที่กำหนด จากการตรวจสอบลักษณะภายนอกด้วยตาเปล่า พบว่าชิ้นงานหล่อทั้งหมดเต็มแบบ ไม่มีรอย

ประสานที่ผิวชิ้นงาน (Cold Shut) และครีป (Flash) จากทุกสภาวะการหล่อ เนื่องจากเทียนต้นแบบที่ใช้ในการทำแบบหล่อปูนปลาสเตอร์มีขนาดแตกต่างจากที่ออกแบบไว้ ดังนั้นขนาดตั้งต้นที่ใช้ในการคำนวณร้อยละการหดตัวมีค่าดังนี้ กว้าง 19.60 มิลลิเมตร ความยาว 23.60 มิลลิเมตร และความหนา 1.98 มิลลิเมตร ผลการวัดขนาดชิ้นงานหล่อด้วยอุณหภูมิหลอม 990 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแบบหล่อที่ 400, 550 และ 630 องศาเซลเซียส

คำนวณร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรตามสมการที่ 1 แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าชิ้นงานหล่อด้วยอุณหภูมิแบบหล่อ 400 องศาเซลเซียส การหดตัวเชิงปริมาตรต่ำสุด คิดเป็นร้อยละ 2.23 เมื่อเทียบกับการหล่อที่อุณหภูมิแบบหล่อ 550 และ 630 องศาเซลเซียส ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเทโลหะหลอมเหลวลงในแบบหล่อที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ทำให้อัตราการเย็นตัวของโลหะแตกต่างกัน [4] ส่งผลถึงขนาดของชิ้นงาน



รูปที่ 3 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรของชิ้นงานหล่อ

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Korojy และคณะ [9] รายงานว่าโลหะผสมของทองแดง-ตะกั่ว และโลหะผสมของทองแดง-ดีบุก-ตะกั่ว ทำการหลอมวัดอุณหภูมิด้วยเตาอินดักชั่นภายใต้บรรยากาศแก๊สอาร์กอน การหดตัวเชิงปริมาตรมีค่าประมาณร้อยละ 3 เมื่อพิจารณาที่การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของชิ้นงาน พบว่าเป็นผลจากอัตราการเย็นตัวในกระบวนการแข็งตัว การเปลี่ยนแปลงปริมาตรลดลงเมื่ออัตราการเย็นตัวสูงขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวลดลง เช่นเดียวกับ Ogura [10] รายงานว่าการหดตัวของชิ้นงานเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโลหะหลอมเหลวภายในโพรงแม่พิมพ์ หากเทโลหะหลอมเหลวลงในแบบหล่อที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันทำให้อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานหล่อแตกต่างกัน การหดตัวของชิ้นงานจึงมีค่าแตกต่างกัน จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถใช้เป็นแนวทางในการคำนวณค่าเพื่อร้อยละการ

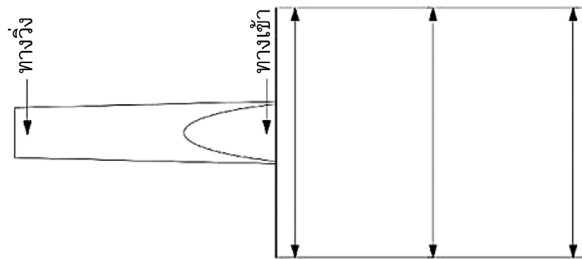
หดตัว สำหรับการหล่อโลหะผสมสีขาวเพื่อผลิตเครื่องประดับแฟชั่นที่มีลักษณะพื้นผิวกว้างและความหนาน้อย ด้วยกระบวนการหล่อขึ้นฝั่งหาย

จากผลการหดตัวเชิงปริมาตร เห็นได้ว่าการหล่อชิ้นงานที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 400 องศาเซลเซียส ชิ้นงานมีการหดตัวเชิงปริมาตรต่ำที่สุด จึงพิจารณาสภาวะการหล่อดังกล่าวที่มีผลต่อการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงาน ตามทิศทาง การไหลของโลหะหลอมเหลวเข้าสู่โพรงแบบหล่อ (แสดงดังรูปที่ 2) ค่าคำนวณร้อยละการหดตัวเชิงเส้นตามสมการที่ 2) ขนาดตั้งต้นที่ใช้ในการคำนวณร้อยละการหดตัวตามทิศทางตั้งฉากกับการไหลมีค่าความกว้าง 19.60 มิลลิเมตร (ตำแหน่ง 1, 2 และ 3) แสดงดังรูปที่ 4 ส่วนขนาดตั้งต้นในการคำนวณร้อยละการหดตัวทิศทางขนานกับการไหล มีค่าความยาว 23.60 มิลลิเมตร (ตำแหน่ง 4, 5 และ 6) แสดงดังรูปที่ 5 ผลการคำนวณร้อยละ

การหดตัวเชิงเส้นตามทิศทางตั้งฉากกับการไหล พบว่า บริเวณใกล้กับทางเข้าโลหะหลอมเหลว (ตำแหน่ง 1) การหดตัวเชิงเส้นสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 0.56 เมื่อเทียบกับ บริเวณกึ่งกลางและขอบชิ้นงาน (ตำแหน่ง 2 และ 3 ตามลำดับ) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากบริเวณใกล้กับทางเข้า

โลหะหลอมเหลวจะมีการป้อนเติมโลหะเข้าสู่โพรงแบบ จนกระทั่งโลหะเต็มโพรงแบบ บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิสูง เนื่องจากเกิดการสะสมความร้อนทำให้การเย็นตัวช้ากว่า บริเวณอื่น ส่งผลให้การหดตัวมีค่ามาก

ตำแหน่ง	1	2	3
ร้อยละการหดตัวเชิงเส้น	0.56	0.36	0.31

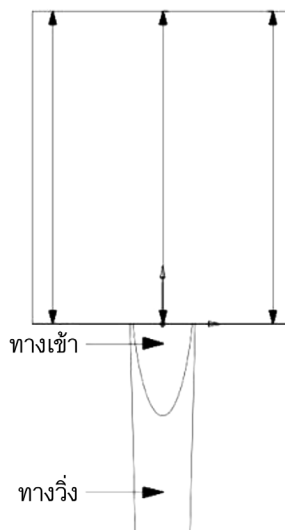


รูปที่ 4 ตำแหน่งการวัดขนาดและร้อยละการหดตัวเชิงเส้น ในทิศทางตั้งฉากกับการไหล

ในขณะที่ ผลการคำนวณร้อยละการหดตัวเชิงเส้นตามทิศทางขนานกับการไหล (รูปที่ 5) พบว่าบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานต่อกับทางเข้าโลหะหลอมเหลว (ตำแหน่ง 5) การหดตัวเชิงเส้นมีค่ามากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 0.81 เมื่อเทียบกับบริเวณด้านข้างของชิ้นงาน (ตำแหน่ง 4 และ 6

ตามลำดับ) เนื่องจากโลหะหลอมเหลวถูกป้อนเติมบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานจนกระทั่งโลหะเต็มโพรงแบบหล่อ ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงและเกิดการเย็นตัวช้ากว่า บริเวณอื่น ดังนั้นการหดตัวจึงมีค่ามาก

ตำแหน่ง	4	5	6
ร้อยละการหดตัวเชิงเส้น	0.47	0.81	0.51

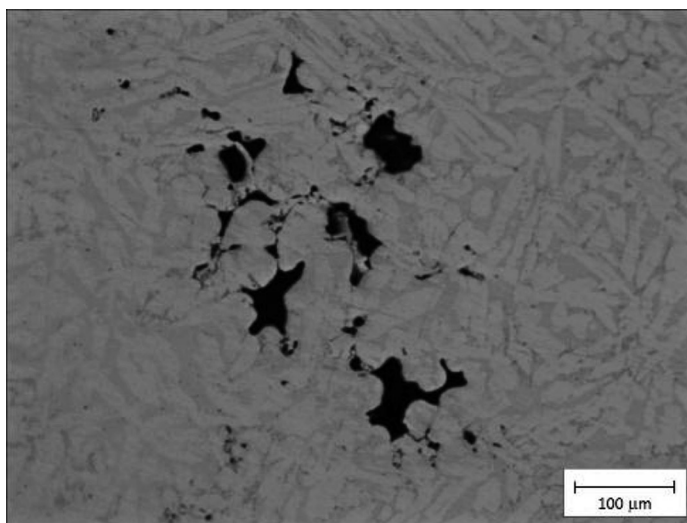


รูปที่ 5 ตำแหน่งการวัดขนาดและร้อยละการหดตัวเชิงเส้น ในทิศทางขนานกับการไหล

จากผลการศึกษาการหดตัวเชิงเส้นตามทิศทางการไหลเข้าโพรงแบบของโลหะหลอมเหลว พบว่าแต่ละบริเวณมีค่าการหดตัวแตกต่างกัน เป็นผลมาจากการลดอุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวภายในแบบหล่อจนกระทั่งแข็งตัว บริเวณขอบของชิ้นงาน (ตำแหน่ง 3, 4 และ 6) จะลดอุณหภูมิโลหะก่อนบริเวณใกล้กับทางเข้าของโลหะหลอมเหลวและบริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน เนื่องจากมีการสะสมความร้อนจากการป้อนเติมโลหะหลอมเหลว ทำให้การหดตัวแต่ละบริเวณมีค่าแตกต่างกัน ทั้งนี้การเย็นตัวลักษณะดังกล่าวบริเวณที่มีอุณหภูมิลดลง หากมีช่องว่างเกิดขึ้นภายในเนื้อโลหะจะมีการหดตัวของโลหะหลอมเหลวจากบริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน เมื่อโลหะลดอุณหภูมิจนกระทั่งแข็งตัว อาจส่งผลให้บริเวณกึ่งกลางชิ้นงานเกิดรูพรุนเนื่องจากการหดตัว

3.2 ผลการวิเคราะห์รูพรุน

ผลการตรวจสอบรูพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงใช้กำลังขยายเลนส์วัตถุ 10 เท่า พบรูพรุนจากการหดตัวที่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 6 รูพรุนมีลักษณะผิวหยาบ รูปร่างไม่แน่นอน และมีลักษณะแบบเดนไดรต์ รูพรุนเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโลหะเพื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งแต่ละบริเวณของชิ้นงานแตกต่างกัน โดยทางเข้าโลหะหลอมเหลวป้อนเติมโลหะบริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน ดังนั้นบริเวณขอบของชิ้นงานจึงมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน เมื่อบริเวณขอบของชิ้นงานลดอุณหภูมิเพื่อเปลี่ยนสถานะโลหะหลอมเหลวจากบริเวณกึ่งกลางจะสามารถไหลเติมเต็มช่องว่างภายในเนื้อโลหะที่อาจทำให้เกิดรูพรุนจากการหดตัว ในทางกลับกันเมื่อโลหะหลอมเหลวลดอุณหภูมิลงจนกระทั่งแข็งตัวทั้งชิ้นงาน บริเวณกึ่งกลางชิ้นงานไม่มีโลหะหลอมเหลวไหลมาชดเชยช่องว่างที่เกิดขึ้นได้ จึงเกิดรูพรุนจากการหดตัว [7]



รูปที่ 6 ลักษณะรูพรุน

จากผลการตรวจสอบรูพรุนด้วยเทคนิควิเคราะห์ด้วยภาพ คำนวณร้อยละพื้นที่รูพรุนต่อพื้นที่ทั้งหมดของชิ้นงานที่หล่อด้วยอุณหภูมิแบบหล่อแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าการหล่อชิ้นงานที่อุณหภูมิแบบหล่อ 400 องศาเซลเซียส พื้นที่รูพรุนต่อพื้นที่ทั้งหมดต่ำสุด คิดเป็นร้อยละ 0.41 เมื่อเทียบกับการหล่อที่อุณหภูมิแบบหล่อ

550 และ 630 องศาเซลเซียส เนื่องจากการหล่อชิ้นงานด้วยอุณหภูมิแบบหล่อสูงบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานถูกดึงเนื้อโลหะไปป้อนเติมช่องว่างขนาดเล็กบริเวณขอบชิ้นงานซึ่งเป็นบริเวณที่เย็นตัวก่อน บริเวณที่เย็นตัวภายหลังไม่มีโลหะเข้ามาเติมเต็มได้ส่งผลให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการหล่อชิ้นงานที่อุณหภูมิแบบหล่อต่ำ

ตารางที่ 1 ผลการตรวจสอบพื้นที่รูพรุน

อุณหภูมิแบบหล่อ (องศาเซลเซียส)	พื้นที่รูพรุน (ตารางไมโครเมตร) ($\times 10^4$)	พื้นที่ทั้งหมด (ตารางไมโครเมตร) ($\times 10^6$)	ร้อยละพื้นที่รูพรุนต่อพื้นที่ ทั้งหมด
400	188	459	0.41
550	261	459	0.57
630	330	459	0.72

ผลการวิจัยดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ott และ Raub [16] ระบุว่ารูพรุนจากการหดตัวสามารถเกิดขึ้นได้ในชิ้นงานขนาดเล็กและการหล่อชิ้นงานใช้อุณหภูมิแบบหล่อต่ำ ส่งผลให้ชิ้นงานหล่อเกิดการแข็งตัวไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ผลการเกิดรูพรุนดังกล่าวอาจป้องกันได้ด้วยการกำหนดอุณหภูมิแบบหล่อเพื่อช่วยให้โลหะหลอมเหลวสามารถไหลตัวได้เต็มโพรงแบบ และเกิดการแข็งตัวในเวลาใกล้เคียงกัน นอกจากนี้การออกแบบระบบป้อนเติมโลหะหลอมเหลวให้สามารถเติมโลหะหลอมเหลวได้ง่ายและเต็มโพรงแบบก่อนเกิดการแข็งตัวจะช่วยลดข้อบกพร่องจากรูพรุนได้เช่นกัน [17] จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบป้อนเติมโลหะหลอมเหลวและกำหนดอุณหภูมิแบบหล่อเพื่อป้องกันการเกิดข้อบกพร่องสำหรับชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีพื้นที่ผิวกว้างและความหนาแน่น

4. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาอุณหภูมิแบบหล่อที่มีผลต่อการเกิดการหดตัวและรูพรุนของชิ้นงานหล่อโลหะผสมสีขาวด้วยกระบวนการหล่อขึ้นดีงหยาบ สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. อุณหภูมิแบบหล่อที่ใช้ในกระบวนการหล่อขึ้นดีงหยาบ มีผลต่อการเกิดรูพรุนและการหดตัวของโลหะผสมสีขาวรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความกว้าง 20 มิลลิเมตร ความยาว 24 มิลลิเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร
2. การหล่อชิ้นงานด้วยอุณหภูมิแบบหล่อ 400 องศาเซลเซียส การหดตัวเชิงปริมาตรต่ำกว่าการหล่อชิ้นงานด้วยอุณหภูมิแบบหล่อ 550 และ 630 องศาเซลเซียส
3. การหดตัวเชิงเส้นในทิศทางตั้งฉากบริเวณใกล้ทางเข้าโลหะหลอมเหลวและทิศทางขนานบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานเกิดการหดตัวสูงที่สุด

4. การหล่อชิ้นงานด้วยอุณหภูมิแบบหล่อ 400 องศาเซลเซียส เกิดรูพรุนน้อยกว่าการหล่อชิ้นงานด้วยอุณหภูมิแบบหล่อ 550 และ 630 องศาเซลเซียส

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาโท สัญญาเลขที่ MSD57IO107 จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และบริษัท ไฮ-เทคคลาสติง จำกัด ที่ให้ทุนอุดหนุนในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

1. Beeley, P., 2001, Foundry Technology, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, USA, pp. 239-318.
2. Watanasriyakul, S., 1999, Study and Development of the Properties of Silver Alloy for Jewelry, The Thailand Research Fund (TRF). (In Thai)
3. Wannasin, J., 2010, Metal Casting for Engineers, Department of Mining and Materials Engineering, Prince of Songkla University, pp. 38-39. (In Thai)
4. Campell, J., 2003, Castings, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, USA, pp. 205-231.
5. Beddoes, J. and Bibby, M.J., 1999, Principles of Metal Manufacturing Processes, Butterworth-Heinemann, USA, pp. 30-40.
6. Prakash, D.G., Prasanna, B. and Regener, D., 2005, "Computational Microstructure Analyzing Technique for Quantitative Characterization of

Shrinkage and Gas Pores in Pressure Die Cast AZ91 Magnesium Alloys,” *Computational Materials and Design*, 32, pp. 480-488.

7. Boobsak, P., 2013, Research for Casting Problems and Solutions on the Development of Modern Jewelry Casting, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. (In Thai)

8. Valerio, F., 2003, Handbook on Loss Wax Casting : The Lost Wax Casting Process for Carat Gold Jewellery Manufacture, World Gold Council, UK, pp. 41-43.

9. Korojy, B., Ekbomand, L. and Fredriksson, H., 2008, “On Solidification Shrinkage of Copper-Lead and Copper-Tin-Lead Alloys,” *International Journal of Cast Metals Research*, 22 (1), pp. 179-182.

10. Ogura, H., 1995, “Casting Shrinkage of Thin-Walled Castings,” *Journal of Dentistry*, 23 (4), pp. 239-244.

11. Zhang, X.J., Tong, K.K., Chan, R. and Tan, M., 1995, “Gold Jewellery Casting : Technology Design and Defects Elimination,” *Journal of Materials Processing Technology*, 48, pp. 603-609.

12. Rojananan, S., Gositanon, A. and Rojananan, S., 2011, “The Effect of Spin Casting Process

Parameters on Shrinkage in Zinc Alloy,” *KMUTT Research and Development Journal*, 34 (3), pp. 217-229. (In Thai)

13. Nisaratanaporn, E., 2010, Technology and Metal Materials for The Gem and Jewelry Industry [Online], Available : <http://www.most.go.th/main/files/engineering302082010.pdf> [2015, September 23] (In Thai)

14. Indutherm GmbH. (n.d.), Vacuum Pressure System [Online], Available : http://www.indutherm.de/share/PDFengl__de/More__about__Vib.and__Vac.pdf [2015, September 23]

15. Jitchoom, S., 2013, White Alloy Development for Fashion Jewelry Casting, Master of Engineering Thesis, Materials Technology Program, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut’s University of Technology Thonburi. (In Thai)

16. Ott, D. and Raub, C.J., 1985, Loss Wax Casting of Gold Jewellery, *Gold Bulletin*, pp. 98-108.

17. Janthanapum, S., 2004, “The Defect in Casting Jewelry,” *Proceedings of the 2nd Technology Foundry Thailand Conference*, Bangkok, Thailand, pp. (12-1)-(12-15). (In Thai)

